

**В. К. Шинкаренко***Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, ул. Лысогорская, 12, Киев, 03028, Украина***К ВОПРОСУ О ПОГРЕШНОСТЯХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  $\beta$ -АКТИВНОСТИ ГОРЯЧИХ ЧАСТИЦ МЕТОДОМ АВТОРАДИОГРАФИИ**

Проведен анализ основных источников погрешностей при определении  $\beta$ -активности отдельных горячих частиц методом автордиографии. Рассмотрен вопрос о выборе оптимальных параметров радиографических пятен и условий их регистрации для минимизации погрешностей определения. Показано, что в области минимально возможных учетных уровней потемнения, способствующих регистрации малоактивных частиц, при регистрации радиографических пятен минимальной чувствительностью к колебаниям фона обладает интегральная оптическая плотность пятна. Для более высоких учетных уровней потемнения предпочтительнее в качестве параметра использовать диаметр пятна. Четырехкратная экспозиция одного и того же фрагмента фильтра позволила получить воспроизводимость суммарной активности на фрагменте не хуже 25 % относительного отклонения. Для частиц с высокой активностью, находящихся в зоне экстраполяции калибровочной кривой, эта величина не превышала 50 %.

*Ключевые слова:* автордиография, горячие частицы, определение  $\beta$ -активности.

**Введение**

Автордиографический метод регистрации ядерных излучений основан на их способности действовать на фотографическую эмульсию подобно свету. Первое применение данного метода совпадает с открытием А. Беккерелем [1] радиоактивности в 1896 г., отправной точкой которого было получение фотографии распределения радиоактивного вещества в собственном излучении. Благодаря автордиографии были обнаружены и горячие частицы (ГЧ) – мелкие частицы искусственного радиоактивного материала с высокой удельной активностью, рассеянные в окружающей среде вследствие антропогенной деятельности<sup>1</sup> [2]. Такие частицы, обладая  $\beta$ - или  $\alpha$ -активностью, могут создать, в случае длительной фиксации в одном и том же участке биологической ткани, уровни облучения прилегающих клеточных слоев в сотни и тысячи рад.

При ингаляционном поступлении радиоактивных веществ в организм человека первоначальное отложение радиоактивных аэрозолей в различных отделах дыхательного тракта определяется аэродинамическим диаметром аэрозольных частиц, тогда как характер первоначального отложения радиоактивных веществ определяет уровни облучения тех или иных органов и тканей. Поэтому определение дисперсного состава радиоактивных аэрозолей, в особенности это относится к промышленным аэрозолям, имеет первостепенное значение для оценки дозы облучения. В зависимости от нуклидного состава, класса растворимости и активностного медианного аэродинамического диаметра (АМАД) аэрозольных частиц для оценки эффективной дозы на все тело используют соответствующие дозовые коэффициенты. Они позволяют перейти от активности частиц радиоактивного аэрозоля, осажденных в отделах дыхательного тракта, к эффективной дозе ионизирующего излучения. Согласно данным, приведенным в Публикации 68 МКРЗ [4], дозовый коэффициент может изменяться в зависимости от величины АМАД радиоактивного аэрозоля примерно на порядок.

В настоящее время ГЧ все еще представляют собой нерешенную проблему дозиметрии [5, 6]. Этой проблеме посвящен ряд документов МКРЗ [7] и NCRP [8, 9], имеющих рекомендательный характер. В документах по радиационной безопасности, действующих на территории Украины, нормативы содержания горячих аэрозольных частиц во вдыхаемом человеком воздухе еще не разработаны и при нормировании учитывается только суммарная активность радиоактивных аэрозолей. Однако для оценки возможных эффектов воздействия аэрозолей с учетом наличия в их составе ГЧ важно вести учет их поступления в организм как для персонала ЧАЭС, так и для населения.

Кроме того, информация об активности, размерах, концентрации и составе ГЧ позволяет судить о происхождении, механизме образования и путях распространения радиоактивных аэрозолей. Это расширяет возможности осуществления эффективных мероприятий по профилактике поражений радиоактивными аэрозолями.

© В. К. Шинкаренко, 2018

---

<sup>1</sup> Общепринятого определения ГЧ не существует [3], это понятие используют в случаях, когда возникает необходимость учитывать особенности ГЧ как стабильного образования – вероятностный характер попадания в объект и/или неоднородность распределения излучения вблизи частицы.

Радиография является уникальным методом исследования ГЧ. В этом процессе происходит одновременное измерение активности многих ГЧ – каждая частица имеет «индивидуальный» детектор – прилегающий участок фотопленки. В ходе проявления накопленные такими мини-детекторами сигналы значительно усиливаются – в  $10^8 - 10^{10}$  раз, что вполне сравнимо с современными радиометрами. Метод является неразрушающим – в случае необходимости можно получить несколько радиограмм с одной и той же поверхности без изменения ее свойств. Полученную радиограмму также можно хранить очень долго и при необходимости повторно обрабатывать. Одновременно с оценкой активности ГЧ автордиограмма дает информацию о положении отдельных частиц, что позволяет отобразить отдельные ГЧ или их группы. Весьма существенными также являются простота выполнения и минимальная стоимость измерительной аппаратуры. Основным недостатком – большое время измерений, что ограничивает применение автордиографии как средства оперативного контроля.

Со времен выхода известных работ по радиографии [10 - 13] основной прогресс в области обнаружения и исследования ГЧ радиографическими методами связан с широким использованием компьютерной техники при обработке и анализе радиограмм. Вместо ручного измерения размеров радиографических пятен с диффузным краем, т.е. пятен без четко выраженной границы, появилась возможность провести сканирование автордиограммы и получить цифровую информацию о распределении плотности почернения на любом ее участке. Применение пакетов обработки и анализа изображений позволяет в течение нескольких минут получить информацию о линейных размерах, площади, форме, интенсивности почернения для всех присутствующих на автордиограмме пятен. Параллельная обработка автордиограмм фильтра и линейки частиц с известной активностью позволяет вычислить активности обнаруженных ГЧ, исходя из параметров их радиографических пятен и пятен от частиц с известной активностью.

Вместе с тем остается открытым вопрос о достижимой точности и надежности радиографических измерений, а также о влиянии на эти параметры условий экспонирования, обработки и фотометрирования автордиограмм.

Целью данной работы является анализ возможных источников ошибок при радиографическом определении активности отдельных ГЧ, в частности выбор параметров радиографических пятен и отсчетного уровня потемнения, наименее чувствительных к влиянию случайных шумов.

### Материалы и методика эксперимента

Воздушные фильтры экспонировались в ближней зоне объекта «Укрытие». Материал фильтров – ткань Петрянова ФПП-15-1.5. Радиографические исследования проводили с использованием медицинской рентгеновской пленки фирмы Carastream. Усиливающие экраны не применялись. Были использованы стандартные рецепты проявляющего (Рентген-2) и фиксирующего растворов. Время проявления (5 мин) выдерживалось с точностью  $\pm 5$  с. Цифровые денситограммы автордиографических пятен получали путем сканирования в режиме отражения, для этого использовали сканер Epson Perfection 1670, разрешение 600 точек на дюйм. Определение параметров радиографических пятен проводили с помощью пакета обработки изображений Image-Pro Plus 6.0.

Линейка частиц с известной активностью (ЛЧИА) была составлена из вырубленных ранее кружочков фильтров, которые содержали отдельные ГЧ и имели низкий уровень постороннего фона. Бета-активности отобранных частиц были определены с помощью низкофонового пропорционального счетчика LB-720 (Bekman). Методика получения автордиограмм воздушных фильтров описана в [14 - 16]. Определение параметров калибровочных кривых и статистическая обработка результатов были проведены в среде пакета Statistica-6,0.

### Результаты и их обсуждение

Измерение активности отдельных ГЧ радиографическим методом связано с последовательным выполнением ряда процедур, с каждой из которых можно соотнести ряд факторов, вносящих свой вклад в ошибку измерений. Обозначим источники возможных ошибок на каждом шаге процесса.

1. Ошибки, связанные со случайным распределением ГЧ по поверхности фильтра и природой частиц:
  - суммарные активности отдельных фрагментов фильтра могут существенно отличаться из-за случайного попадания одной или нескольких высокоактивных ГЧ;

- образование пятен псевдочастиц из-за слияния пятен отдельных близкорасположенных частиц. В результате будут зарегистрированы несуществующие частицы, активности которых могут существенно отличаться от суммарной активности слившихся ГЧ;
  - проскок частиц в глубину фильтра. Частица, расположенная в глубине ткани Петрянова на некотором расстоянии от фотослоя дает размытое пятно со слабо выраженным центральным максимумом. Понятно, что сравнение таких пятен с пятнами от линейки частиц некорректно.
2. Экспозиция радиограмм:
- отличия в условиях экспозиции фильтров и ЛЧИА;
  - выбор времени экспозиции. Для достижения максимальной чувствительности по активности следует увеличить время экспозиции, поскольку пятно формирует полученная доза. Для фильтров с большим количеством ГЧ и высокой удельной активностью время экспозиции приходится сокращать во избежание слияния радиографических пятен;
  - необходимость использования защитного покрытия поверхности фильтра, идентичность защитного покрытия для ЛЧИА и исследуемого фрагмента фильтра;
  - повышенная влажность фотослоя способствует регрессии скрытого изображения [12]. Экспонирующиеся фильтры должны быть воздушно-сухими или необходимо влагонепроницаемое защитное покрытие. Для экспозиции следует избегать помещений с повышенной влажностью.
3. Проявление рентгеновских пленок:
- отличия в условиях проявления ЛЧИА и фрагментов фильтров при их отдельной экспозиции (время проявления, температура и старение проявителя);
  - неоднородности вуали фотослоя, толщины и окраски подложки фотопленки;
  - дефекты фотослоя, возникшие в процессе обработки – царапины, пылинки на фотослое.
4. Сканирование:
- отличия в настройках при сканировании линейки частиц и радиограммы фильтра могут привести к непредсказуемым последствиям и вызвать ошибку вплоть до порядка величины. Поэтому радиограммы ЛЧИА и каждого из воздушных фильтров должны сканироваться одновременно, даже в случае, когда используется одна радиограмма линейки частиц для нескольких радиограмм фильтров;
  - сканирование радиограммы фильтра, экспонированного одновременно с линейкой частиц менее чувствительно к грубым просчетам в настройке сканера, однако некорректный режим сканирования способен существенно ухудшить погрешности распознавания пятен.
5. Построение калибровочной кривой и вычисление активности отдельных частиц по параметрам их радиографических пятен:
- ошибки определения активности отдельных частиц ЛЧИА;
  - влияние выбора рабочего параметра пятна на точность определения активности частиц;
  - влияние выбора начального уровня почернения на точность построения калибровочной кривой и определение активности.

### Измеряемые параметры радиографических пятен

На рис. 1 представлено трехмерное изображение радиографического пятна. По оси  $z$  отложена оптическая плотность  $\alpha$ , ( $\alpha = -Lg\left(\frac{I}{I_0}\right)$ , где  $I$  – интенсивность прошедшего,  $I_0$  – падающего света). В делениях шкалы сканера оптическую плотность обычно называют уровнем почернения. Линия пересечения изображенной на рисунке фигуры с параллельной основанию плоскостью, расположенной на высоте минимального уровня черного  $z_{\min}$ , образует границу пятна. Пятно традиционно характеризуют величиной его диаметра  $D$  на заданном уровне почернения. Характеристиками пятна могут также выступать его площадь  $S$ , интегральная оптическая плотность (ИОП), представляющая собой объем изображенной на рисунке фигуры и исправленная интегральная оптическая плотность (ИИОП) – соответствует объему фигуры над плоскостью  $z_{\min}$ .

Выполняя измерения, мы можем выбирать значения уровня  $z_{\min}$  по своему усмотрению. Понятно, что для достижения максимальной чувствительности этот уровень должен быть минимально

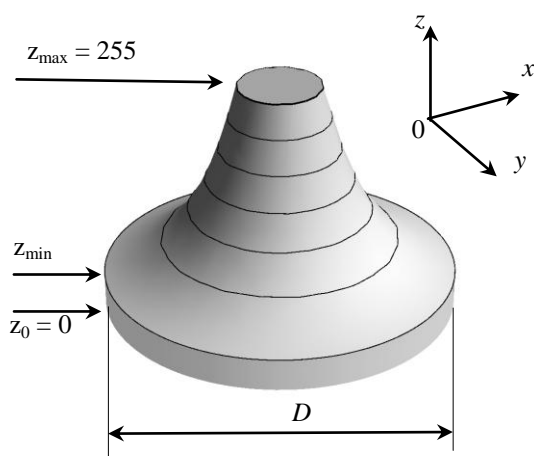


Рис. 1. Распределение интенсивностей почернения в районе локализации радиографического пятна, возникшего под действием излучения ГЧ.

возможным. Однако со снижением этого уровня возрастает вклад флуктуаций фонового почернения фотопластинки, обусловленного неоднородностями фотографической вуали, а также неоднородностями толщины и окраски подложки фотопластинки.

Выясним, как влияет выбор минимального уровня  $z_{\min}$  на погрешности определения каждого из параметров пятна. Требование минимизации погрешностей весьма существенно, поскольку в ходе определения активности ГЧ эти погрешности срабатывают как при построении калибровочной кривой, так и при последующем определении активностей отдельных частиц.

На рис. 2 представлены фотография одного из радиографических пятен (а), профиль распределения почернения<sup>2</sup> по сечению пятна (б) и приближение данного профиля контуром Лоренца (в):

$$z = A \cdot \frac{H^2}{H^2 + x^2} + k, \tag{1}$$

где  $A$  – амплитудный множитель,  $H$  – полуширина контура на половине его высоты,  $k$  – уровень фона. Контур ограничен сверху уровнем максимально черного  $z_{\max} = 255$ . Высокий уровень корреляции экспериментально найденных точек и данного контура позволяет принять выражение (1) в качестве математической модели контура пятна. Представленная на рис. 1 фигура получена вращением данно-

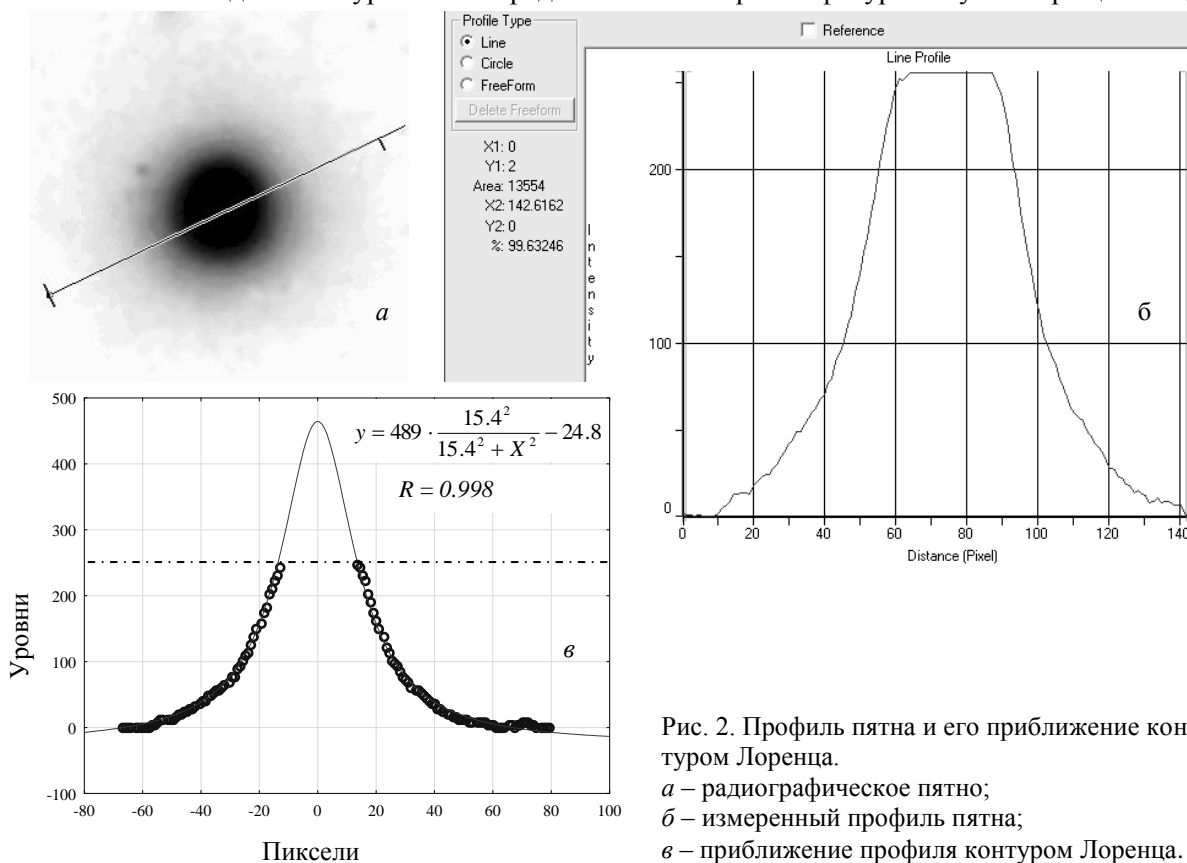


Рис. 2. Профиль пятна и его приближение контуром Лоренца.  
 а – радиографическое пятно;  
 б – измеренный профиль пятна;  
 в – приближение профиля контуром Лоренца.

го контура вокруг оси  $z$ :

$$z = A \cdot \frac{H^2}{H^2 + x^2 + y^2} + k = A \cdot \frac{H^2}{H^2 + R^2} + k, \tag{2}$$

<sup>2</sup> Реально пакет Image-Pro Plus 6.0 измеряет уровни белого, отсканированные изображения перед измерениями приходится инвертировать, т.е. превращать из негатива в позитив.

где  $R$  – радиус пятна на высоте  $z$ . Фигура ограничена горизонтальными плоскостями  $Z_{\min}$  и  $Z_{\max}$ . Если  $A + k > 255$ , имеем пик со срезанной вершиной, в противном случае центр пика не достигает уровня максимально черного. Найдем, как зависит относительная ошибка определения параметров пятна в зависимости от выбора минимального уровня черного  $Z_{\min}$  при заданном уровне фона  $k$ . Оценим относительные ошибки для четырех параметров – диаметра пятна  $D$ , его площади  $S$ , интегральной плотности ИОП и исправленной интегральной плотности ИИОП. Три из этих параметров ( $D$ ,  $S$  и ИОП) можно получить с помощью пакета Image-Pro непосредственно. Величину ИИОП можно найти, вычитая из ИОП объем лежащей в основании рис.1 шайбы:

$$\text{ИИОП} = \text{ИОП} - S \cdot Z_{\min}. \quad (3)$$

### Относительная ошибка определения диаметра пятна

Поскольку относительные ошибки определения радиуса  $\varepsilon(R)$  и диаметра  $\varepsilon(D)$  пятна совпадают, будем искать  $\varepsilon(R)$ . Из формулы (2) найдем значение  $R$  при заданном значении  $Z_{\min}$ .

$$R = H \sqrt{\frac{A}{Z_{\min} - k} - 1}. \quad (4)$$

Относительная ошибка функции двух переменных  $F(x, y)$  может быть найдена, используя частные производные:

$$\varepsilon(F) = \sqrt{\left(\frac{dF}{dx} \cdot \frac{\Delta x}{F}\right)^2 + \left(\frac{dF}{dy} \cdot \frac{\Delta y}{F}\right)^2}, \quad (5)$$

где  $\Delta x$  и  $\Delta y$  соответствующие ошибки определения.

В нашем случае ошибки связаны с тремя неопределенностями – ошибкой оцифровки сигнала на уровне  $Z_{\min}$ , уровнем колебания фона  $k$  и неопределенностью определения  $R$ , связанной с флуктуациями уровня почернения вблизи уровня  $Z_{\min}$ .

Найдем частные производные:

$$\frac{dR}{dk} = \frac{AH}{(Z_{\min} - k)^2}, \quad \frac{dR}{dZ_{\min}} = -\frac{AH}{(Z_{\min} - k)^2}. \quad (6)$$

Относительную ошибку найдем согласно выражению (5):

$$\varepsilon(R) = \sqrt{\left(\frac{dR}{dk} \cdot \frac{\Delta k}{R}\right)^2 + \left(\frac{dR}{dZ_{\min}} \cdot \frac{\Delta Z_{\min}}{R}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2}. \quad (7)$$

После подстановки и преобразования получим

$$\varepsilon(R) = \frac{\sqrt{A^2 H^2 (\Delta k^2 + \Delta z^2) + \Delta R^2 (Z_{\min} - k)^4}}{H (Z_{\min} - k) (A + k - Z_{\min})}. \quad (8)$$

В нашем случае  $Z_{\min} - k$  всегда больше нуля, иначе вместо отдельных пятен мы получаем сплошной фон. Если  $A + k < Z_{\min}$  мы просто не увидим пика, поскольку его вершина будет ниже минимального учетного уровня. Ошибку оцифровки  $\Delta Z$  примем равной 1, уровень колебания фона  $\Delta k$  существенно выше, для определенности примем  $\Delta k = 5$ , ошибку  $\Delta R$  положим равной 3. График зависимости  $\varepsilon(R)(k, Z_{\min})$  для  $A = 400$  и  $H = 10$  приведен на рис 3. Отметим резкий рост относительной погрешности при снижении учетного уровня и его приближении к уровню фона. Согласно формуле (8), при  $Z_{\min} \rightarrow k$   $\varepsilon(R) \rightarrow \infty$ .

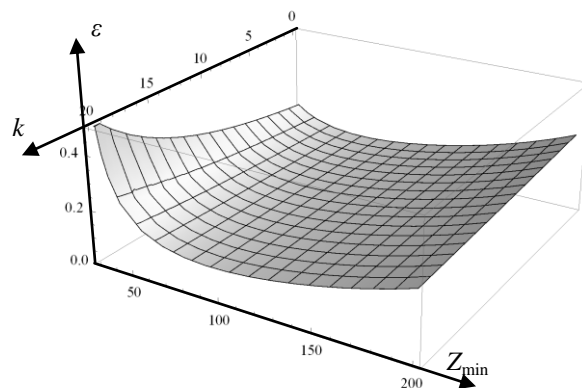


Рис. 3. Зависимость относительной ошибки определения диаметра от выбора минимального уровня черного  $Z_{\min}$  и величины фона  $k$ .

## Сравнение относительных ошибок для выбранных параметров

Относительная ошибка определения площади пятна  $\varepsilon(S) \approx 2 \varepsilon(R)$ , поскольку  $S = \pi R^2$ . Аналогично  $\varepsilon(R)$  были получены довольно громоздкие выражения для относительных ошибок ИОП и ИИОП, которые здесь не приводятся. На рис. 4 приведены графики зависимостей относительных ошибок выбранных параметров пятен при двух фиксированных уровнях фона  $k$  для интенсивных пятен ( $A = 400$ ) и пятен малой интенсивности ( $A = 200$ ). Значения для  $\varepsilon(S)$  не приведены,  $\varepsilon(S)$  отвечают удвоенные ординаты зависимости  $\varepsilon(R)$ .

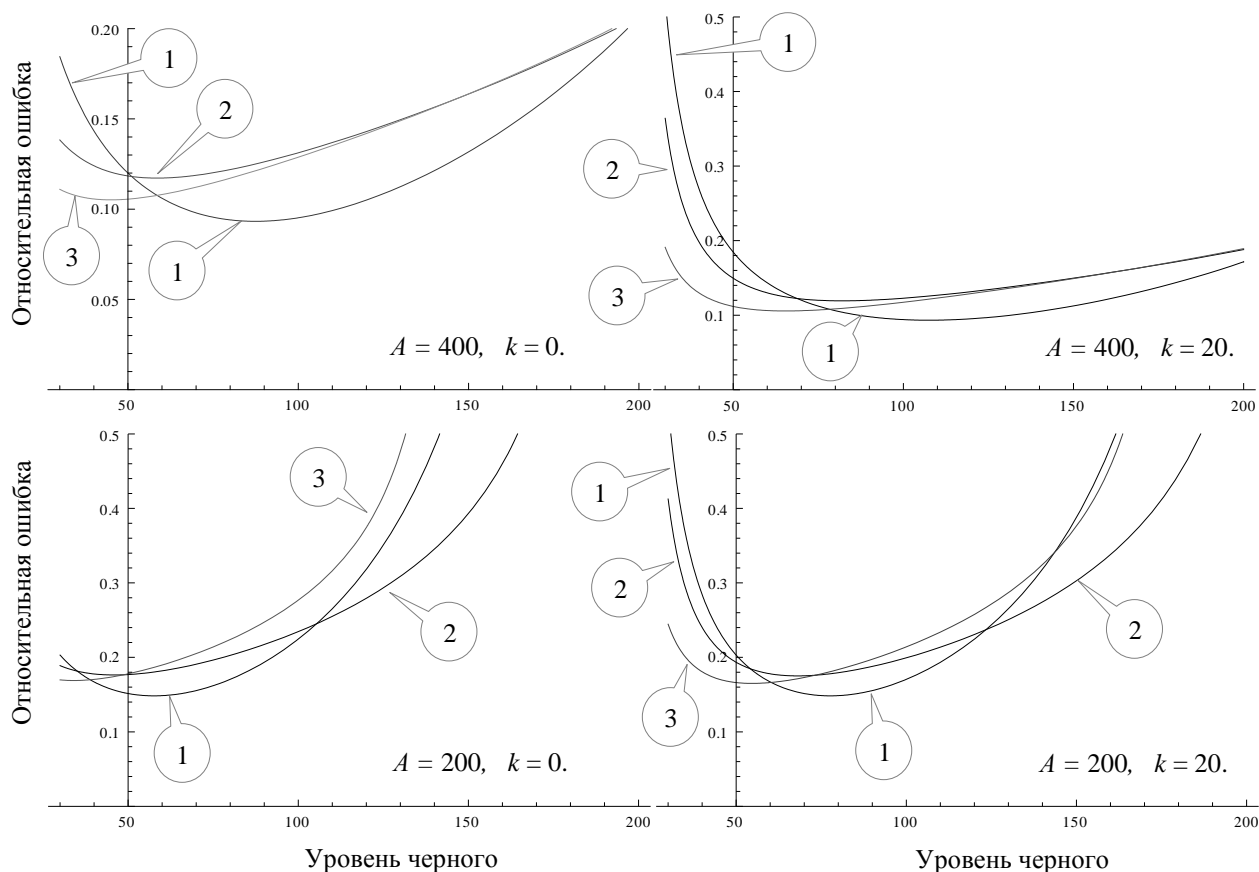


Рис. 4. Относительные ошибки определения параметров радиографических пятен.  
 $k$  - уровень фонового почернения.

$A = 400$ . Интенсивность в центре пятна выше максимально черного ( $A + k > 255$ ).

$A = 200$ . Интенсивность в центре пятна ниже максимально черного ( $A + k < 255$ ).

1 - диаметр; 2 - ИОП; 3 - ИИОП.

Как видно из рис. 4, минимальной ошибкой в области малых значений учетного уровня обладает параметр ИИОП, обозначенный на рисунке цифрой 3. Однако этот параметр непосредственно не измеряется, для его определения согласно формуле (3) нужно использовать значение площади пятна  $S$ . Поэтому относительная ошибка при вычислении этого параметра будет несколько выше  $\varepsilon(S)$ , что делает его дальнейшее использование бесперспективным. Эффективность использования двух оставшихся параметров меняется в зависимости от выбранного учетного уровня. В области малых значений  $Z_{\min}$  меньшие значения относительной погрешности имеет ИОП, для более высоких значений - диаметр пятна.

Отметим, что полученные зависимости носят качественный характер, поскольку для их построения были использованы произвольно выбранные значения параметров контура Лоренца ( $A$  и  $H$ ) и абсолютных погрешностей  $\Delta z$ ,  $\Delta R$  и  $\Delta k$ . Кроме того, в пакете обработки изображений могут быть свои скрытые источники ошибок и некоторые несоответствия. Так, например, средний диаметр пятна  $d_{cp}$  определяется как средняя длина диаметров, измеренных с интервалом в 2 град и проходящих через центр тяжести пятна. Площадь пятна подсчитывается как сумма пикселей внутри контура пятна. Поэтому площадь пятна только приблизительно соответствует  $\pi d_{cp}^2 / 4$ .

### Экспериментальное определение относительных погрешностей параметров

Для авторадиограммы линейки частиц с известной активностью были определены четыре вышеперечисленных параметра пятен при различных значениях учетного уровня. Были получены также изменения этих величин ( $\Delta S$ ,  $\Delta D$ ,  $\Delta(\text{ИОП})$ ,  $\Delta(\text{ИИОП})$ ) для единичных отклонений учетного уровня и найдены соответствующие относительные ошибки:  $\varepsilon(F) = \frac{|\Delta F|}{F}$ . Влияние величины учетного уровня на относительную погрешность определения диаметра и ИОП пятна при изменении уровня фона на 1 уровень черного для частиц с активностями 110 и 0,9 Бк представлено на рис. 5.

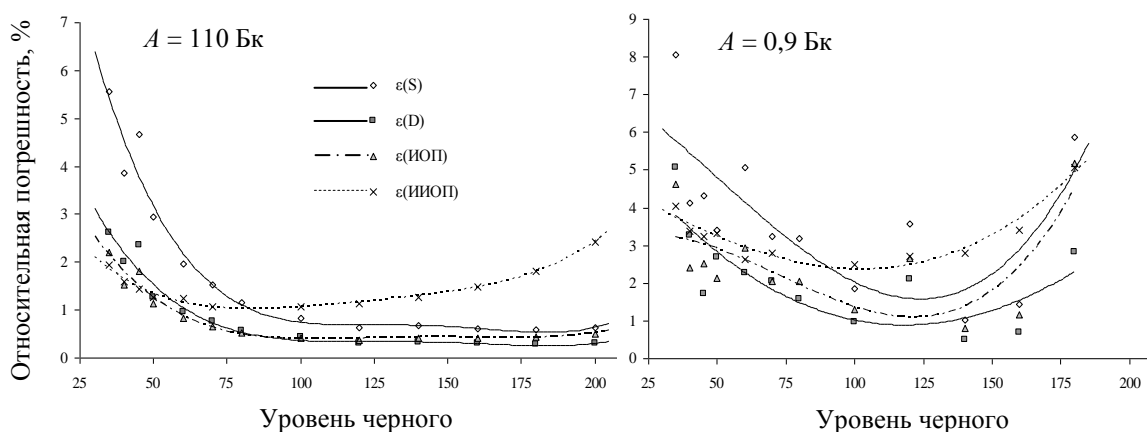


Рис. 5. Влияние величины учетного уровня на относительную погрешность параметров пятна при изменении фона на 1 уровень черного.

Сравнение рис. 4 и 5 демонстрирует хорошее качественное соответствие рассчитанных и измеренных относительных отклонений. В области малых значений учетного уровня минимальную относительную ошибку дает интегральная оптическая плотность, для более высоких значений предпочтение следует отдать диаметру. Всегда ли сохраняются эти соотношения или в других условиях (марка пленки, проявитель, режим проявления и т.п.) могут быть нарушены – данный вопрос остается открытым.

Влияние выбора учетного уровня черного на результаты измерений демонстрирует табл. 1. Одна и та же радиограмма и соответствующая ей линейка частиц были оценены при двух минимальных уровнях черного – 45 и 95. По координатам центров пятен были найдены соответствующие пятна. Произведена оценка их активности, а также определены активности, соответствующие дополнительным пятнам, обнаруженным при малых уровнях черного. Как видим, снижение уровня черного привело к существенному росту числа зарегистрированных частиц, их количество возросло почти в 2,5 раза – были обнаружены 452 малоактивные частицы с суммарной активностью 91 Бк. При этом лишь на 8 % возросла активность видимых на уровне У-95 частиц. Главным образом это произошло вследствие слияния крупных пятен с находящимися поблизости мелкими пятнами.

Дальнейшее снижение учетного уровня (до 30 - 35) ведет к резкому росту числа слившихся частиц и появлению псевдочастиц на месте флуктуаций фона. Следовательно, выбор минимального учетного уровня есть вопрос компромисса между желанием зарегистрировать более мелкие частицы и увеличением погрешности измерений более крупных частиц, а также опасностью регистрации крупных несуществующих частиц вследствие слияния пятен. Для контроля можно рекомендовать многократное определение активности частиц на нескольких учетных уровнях с последующим сопоставлением активности пятен по их координатам. Появление новых частиц с высокой активностью при снижении учетного уровня свидетельствует об образовании конгломератов пятен. Можно сделать попытку развести данные пятна в графическом редакторе и повторить обработку. Если это не удастся, – приходится увеличивать учетный уровень.

Для оценки воспроизводимости метода было проведено пятикратное экспонирование одного и того же фильтра совместно с той же линейкой частиц. Результаты приведены в табл. 2. Наблюдается хорошее соответствие суммарной активности и числа зарегистрированных частиц.

Таблица 1. Результаты определения активностей ГЧ при двух минимальных уровнях черного

Параметр	У-45	У-95	$\frac{У-45}{У-95}$
Число частиц	772	313	2,47
Суммарная активность, Бк	270,9	164	1,65
Число дополнительно обнаруженных мелких частиц	452		
Суммарная активность мелких частиц, Бк	91,4		
Суммарная активность совпадающих частиц, Бк	173,5	161,3	1,08
Число совпадающих частиц	301	301	1,0
Число зарегистрированных размытых пятен	19		
Суммарная активность размытых пятен, Бк	5,97		
Минимально-регистрируемая активность, Бк	0,173	0,207	0,84

Таблица 2. Результаты пятикратного экспонирования одного и того же фильтра

Параметр	Номер радиограммы					Среднее по суточной экспозиции	$\pm m$ , для $p = 0,95$
	1	2	3	4	5		
Калибровочная кривая по ЛЧИА, экспонированной с данной авторадиограммой							
Время экспозиции, сут	1	1	1	3	10		
Суммарная активность на фрагменте, Бк	4916	4426	4833	5826	7947*	4725	651 (13,8 %)
Число частиц на фрагменте	857	853	869	1699	1609	860	21 (2,4 %)
Минимальная активность ГЧ, Бк	0,98	0,5	0,74	0,28	0,5		
Максимальная активность ГЧ, Бк	338	190	404	414	1200**	337***	164 (49) %
Калибровочная кривая по ЛЧИА, экспонированной с другой авторадиограммой							
Суммарная активность, Бк, линейка 1	4916	4611	5426			4984	1023 (20,5) %
Суммарная активность, Бк, линейка 2	4639	4426	5025			4697	754 (16,1) %
Суммарная активность, Бк, линейка 3	4419	4178	4833			4477	823 (18,4) %
Среднее по радиограмме	4658	4405	5095			<b>4719</b>	
$\pm m$ , для $p = 0,95$ , Бк	619	540	752				<b>289</b>
$\pm$ % к среднему	13,3	12,3	14,8				<b>6,1</b>

\* Уровень черного 150, результат завышен, слияние пятен.

\*\* Слияния пятен. Образовались две крупные псевдочастицы с активностями 1200 и 770 Бк.

\*\*\* Для радиограмм 1 - 4.

На рис. 6 приведены зависимости относительного среднего отклонения при определении активности частиц линейки от величины их измеренной активности. На рис. 6, а вычисления проводили по калибровочной кривой для данной авторадиограммы (4 измерения активности каждой из ГЧ линейки), а на рис. 6, б - по калибровочным кривым всех радиограмм со временем экспозиции 1 - 3 сут. Из данных табл. 2 и рис. 6 видно, что экспозиция одной линейки частиц для серии фрагментов фильтров при тщательном соблюдении условий экспозиции и проявления может обеспечить приемлемую точность, не сильно отличающуюся от точности при одновременной экспозиции линейки и каждого из фрагментов.

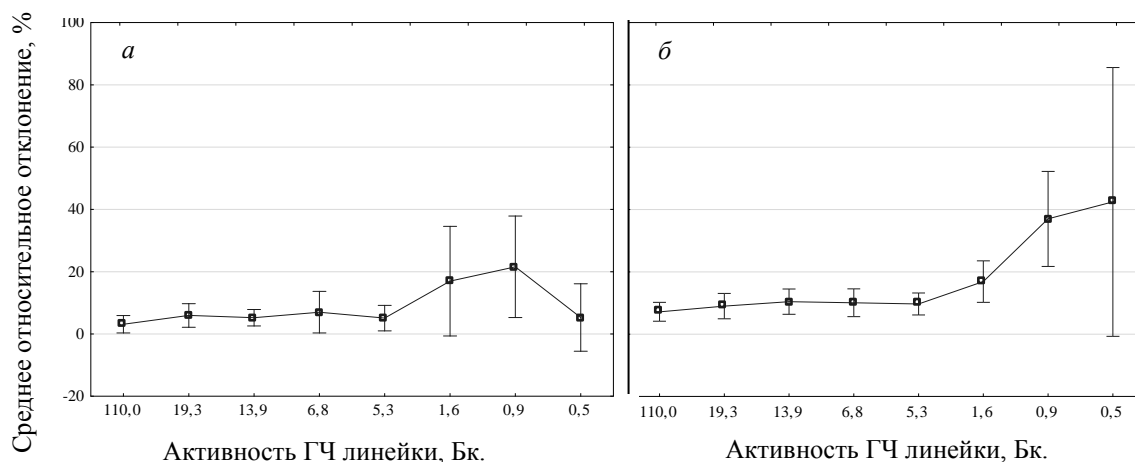


Рис. 6. Зависимость относительного среднего отклонения определения активности частиц линейки от их измеренной активности.

Вычисление проводилось по калибровочной кривой:

*a* – для данной автордиограммы.

*б* – по кривым всех радиограмм с временем экспозиции 1 - 3 сут.

□ - среднее значение;  $\left[ \right]$  - доверительный интервал для  $p = 0,95$ .

### Выводы

Автордиография является уникальным по возможностям, простоте и минимуме требований к измерительной аппаратуре методом исследования ГЧ на поверхности воздушных фильтров.

Вследствие случайного распределения ГЧ по поверхности фильтра возможно слияние пятен близкорасположенных ГЧ с образованием крупного пятна, соответствующего несуществующей псевдочастице, вычисленная активность которой может превышать суммарную активность исходных частиц. Предлагается в ходе ретуши отсканированной радиограммы разносить близкорасположенные пятна с помощью графического редактора.

Показано, что среди рассмотренных параметров радиографических пятен в области малых значений учетного уровня минимальную относительную ошибку имеет интегральная оптическая плотность, для более высоких значений учетного уровня предпочтительнее использовать диаметр пятна.

Выбор минимального учетного уровня радиографического пятна есть вопрос компромисса между желанием зарегистрировать более мелкие частицы и увеличением погрешности измерений крупных частиц, а также опасностью регистрации псевдочастиц на месте флуктуаций фона и вследствие слияния отдельных пятен. Для минимизации уровня предлагается проводить определение активности частиц на нескольких учетных уровнях с последующим сопоставлением активности пятен по их координатам. Появление новых частиц с высокой активностью при снижении учетного уровня свидетельствует об образовании конгломератов пятен. Можно сделать попытку развести данные пятна в графическом редакторе и повторить обработку. Если это не удастся, – приходится увеличивать учетный уровень.

Для обеспечения приемлемой точности измерения при экспозиции одной линейки частиц совместно с серией фрагментов фильтров следует тщательно контролировать условия проявления. Рентгеновскую пленку, на которой экспонирована радиограмма линейки частиц, рекомендуется обрабатывать в середине серии.

Наблюдается рост ошибки определения активности ГЧ, находящихся в зоне экстраполяции калибровочной кривой. Для расширения динамического диапазона линейки частиц предлагается проводить двух- и трехкратную экспозицию линейки на новых участках фотопленки с разным временем экспозиции. Последующий переход к числу распадов позволяет получить расширенную калибровочную кривую.

В заключение хочу выразить благодарность Е. К. Гаргеру и Н. Н. Талерко за полезное обсуждение и постоянный интерес к работе.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Храмов Ю. А. Беккерель Антуан Анри / Ю. А. Храмов // Физики: биографический справочник ; под ред. А. И. Ахиезера. - М. : Наука, 1983. - С. 28. - 400 с.
2. Webb J. H. The Fogging of Photographic Film by Radioactive Contaminants in Cardboard Packaging Materials / J. H. Webb // Physical Review. - August 1, 1949. - Vol. 76, No 3. - P. 375 - 380.
3. Pöllänen Roy. Nuclear fuel particles in the environment - characteristics, atmospheric transport and skin doses / Roy Pöllänen. - STUK-A188. Helsinki, 2002. - 63 p.
4. ICRP Publication 68. Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers // Annals of the ICRP. - 1994. - Vol. 24, № 4.
5. Salbu B. Hot particles - a challenge within radioecology / B. Salbu // Journal of Environmental Radioactivity. - 2001. - Vol. 53. - P. 267 - 268.
6. Dale P. Radioactive particles in dose assessments / P. Dale, I. Robertson, M. Toner // Journal of Environmental Radioactivity. - 2008. - Vol. 99. - P.1589 - 1595.
7. Публикация 103-й Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ) : пер с англ. ; под общей ред. М. Ф. Киселева и Н. К. Шандалы. - М. : Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. - 344 с. (ICRP Publication 103, 2007).
8. NCRP (1975). Alpha-emitting Particles in Lungs. NCRP Report No. 46, National Council of Radiation Protection and Measurements, Bethesda, Maryland.
9. NCRP 1989. Limit for exposure to "hot particles" on the skin: recommendations of the National Council on Radiation Protection and Measurements. NCRP report No. 106, 1989.
10. Бойд Дж. Авторадиография в биологии и медицине / Дж. Бойд. - М. : Изд-во иностр. лит., 1957. - 360с.
11. Быховский А. В. Методические указания по исследованию радиоактивных аэрозолей в случае присутствия в их составе горячих частиц / А. В. Быховский, О. М. Зараев. - Типография Минздрава СССР, 1967. - 40с.
12. Роджерс Э. Авторадиография / Э. Роджерс. - М. : Атомиздат, 1972. - 304 с.
13. Gahan P. V. Autoradiography for biologists / P. V. Gahan. - 1972. - 125 p.
14. Гаргер Е. К. Об измерении  $\beta$ -активности большого количества "горячих" аэрозольных частиц с помощью авторадиографии / Е. К. Гаргер, Б. Л. Горковенко, В. К. Шинкаренко // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. - 2005. - Вип. 2. - С. 33 - 40.
15. Шинкаренко В. К. К определению активности "горячих" частиц радиографическим методом / В. К. Шинкаренко // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. - 2008. - Вип. 9. - С.130 - 139.
16. Гаргер Е. К. Оценка степени растворения радиоактивных аэрозольных частиц из объекта «Укрытие» / Е. К. Гаргер, А. А. Одинцов, В. К. Шинкаренко // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. - 2009. - Вип. 12. - С. 125 - 136.

**В. К. Шинкаренко**

*Институт проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, Київ, 03028, Україна*

**ДО ПИТАННЯ ПРО ПОХИБКИ ВИЗНАЧЕННЯ  $\beta$ -АКТИВНОСТІ ГАРЯЧИХ ЧАСТИНОК  
МЕТОДОМ АВТОРАДІОГРАФІЇ**

Проведено аналіз основних джерел похибок при визначенні  $\beta$ -активності окремих гарячих частинок методом авторадіографії. Розглянуто питання про вибір оптимальних параметрів радіографічних плям і умов їхньої реєстрації для мінімізації похибок визначення. Показано, що в області мінімально можливих облікових рівнів потемніння, що сприяє реєстрації малоактивних частинок, при реєстрації радіографічних плям мінімальну чутливість до коливань фону має інтегральна оптична густина плями. Для більш високих облікових рівнів потемніння в якості параметра краще використовувати діаметр плями. Чотириразова експозиція одного й того ж фрагмента фільтра дозволила отримати відтворюваність сумарної активності на фрагменті не гірше 25 % відносного відхилення. Для частинок із високою активністю, що знаходились у зоні екстраполяції калібрувальної кривої ця величина не перевищувала 50 %.

*Ключові слова:* авторадіографія, гарячі частинки, визначення  $\beta$ -активності.

**V. K. Shynkarenko**

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, NAS of Ukraine, Lysogirska str., 12, Kyiv, 03028, Ukraine*

**TO PROBLEMS OF HOT PARTICLES  $\beta$ -ACTIVITY DETERMINATION ERRORS  
BY THE AUTORADIOGRAPHY METHOD**

The analysis of the basic sources of errors under measuring of separate hot particles  $\beta$ -activity by the autoradiography method is carried out. The problem of selecting optimum parameters of radiographic spots and requirements to their detection for minimization of an activity determination error is considered. It is shown that in the area of minimum-possible registration levels of a darkening which enable detecting low-active particles, at recording of radio-

graphic spots the integrated optical density of a spot is a minimum sensitive to background oscillations. For higher registration levels of a darkening it is more preferable to use a spot diameter as a parameter. The quadruple exposure of the same filter fragment has allowed reproducing the total activity on a fragment not worse 25 % of the relative deviation. For particles with the high activity within the range of the calibration curve extrapolation this quantity did not exceed 50 %.

*Keywords:* autoradiography, hot particles,  $\beta$ -activity measuring.

#### REFERENCES

1. *Hramov Ju. A.* Becquerel Antoine Anri / Ju. A. Hramov // *Physicists: the Biographic manual.* – 1983. – P. 28. – 400 p. (Rus)
2. *Webb J. H.* The Fogging of Photographic Film by Radioactive Contaminants in Cardboard Packaging Materials / J. H. Webb // *Physical Review.* – August 1, 1949. – Vol. 76, No. 3. – P. 375 – 380.
3. *Pöllänen Roy.* Nuclear fuel particles in the environment - characteristics, atmospheric transport and skin doses / Roy Pöllänen. STUK-A188. Helsinki 2002, 63 p.
4. *ICRP Publication 68.* Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers // *Annals of the ICRP.* 1994. V.24. № 4.
5. *Salbu B.* Hot particles - a challenge within radioecology / B. Salbu // *Journal of Environmental Radioactivity.* – 2001. – Vol. 53. – P. 267 - 268.
6. *Dale P.* Radioactive particles in dose assessments / P. Dale, I. Robertson, M. Toner // *Journal of Environmental Radioactivity.* – 2008. – Vol. 99. – P. 1589 – 1595.
7. *ICRP Publication 103.* ICRP, 2007. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (Users Edition). ICRP Publication 103 (Users Edition).
8. *NCRP (1975).* Alpha-emitting Particles in Lungs. NCRP Report No. 46, National Council of Radiation Protection and Measurements, Bethesda, Maryland.
9. *NCRP 1989.* Limit for exposure to “hot particles“ on the skin: recommendations of the National Council on Radiation Protection and Measurements. NCRP report No. 106, 1989.
10. *Boyd G. A.* Autoradiography in biology and medicine / G. A. Boyd. – New York: Academic Press Inc. – 1955. – 360 p.
11. *Bykhovsky A. B.* Methodical instructions on study of radioactive aerosols in case of presence at their composition of hot particles / A. B. Bykhovsky, O. M. Zaraev. – Printing house of Ministry of Health of the USSR, 1967. – 40 c. (Rus)
12. *Rogers A. W.* Techniques of autoradiography / A. W. Rogers. – 3. ed. – 1979. – 429 p.
13. *Gahan P. B.* Autoradiography for biologists / P. B. Gahan. – 1972. – 125 p.
14. *Garger E. K.* About measurement beta-activity of the quantity hot particles with autoradiography / E. K. Garger, V. K. Shinkarenko, B. L. Gorkovenko // *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyly).* – 2005. – Iss. 2. – P. 33 – 40. (Rus)
15. *Shynkarenko V. K.* To definition of activity of hot particles by a radiographic method / V. K. Shynkarenko // *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyly).* – 2008. – Iss. 9. – P. 130 – 139. (Rus)
16. *Garger E. K.* Estimation of the degree of dissolution radioactive aerosols particles from object «Ukryttya» / E. K. Garger, O. O. Odintsov, V. K. Shynkarenko // *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyly).* – 2009. – Iss. 12. – P. 125 – 136. (Rus)

Надійшла 19.03.2018

Received 19.03.2018